

腾格里沙漠人工植被区掘穴蚁 (*Formica cunicularia*) 的生态功能

陈应武^{1,2}, 李新荣^{1,*}, 苏延桂¹, 窦彩虹², 贾晓红¹, 张志山¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 沙坡头沙漠研究与试验站, 兰州 730000; 2. 河南科技大学林学院, 洛阳 471003)

摘要 掘穴蚁 (*Formica cunicularia*) 营筑丘活动, 并通过营巢活动影响土壤的物理化学特性, 是中国干旱和半干旱地区营巢的优势蚁类。在沙坡头人工固沙植被区调查了掘穴蚁对不同固沙年代和不同地形人工固沙区土壤的影响, 研究了掘穴蚁的营巢活动对土壤水分、理化性质和种子库的影响。

研究表明 随着固沙年代的延长, 掘穴蚁的筑丘活动加强。掘穴蚁筑丘活动对地形的选择顺序依次为: 丘间低地 > 迎风坡 > 丘顶 > 背风坡。与邻近土壤相比, 蚁丘的土壤含水量升高, 土壤容重 (0~10cm 深)、有机质、电导率、全氮、全磷、全钾、可溶性氮、可溶性磷和可溶性钾在蚁丘富集; 土壤容重 (0~20cm 深) 和 pH 值下降。蚁丘对土壤种子库有明显影响 ($p < 0.01$), 种子密度和多样性指数在不同取样点间的大小顺序为: 苔藓结皮上的蚁丘 > 苔藓结皮 > 地衣结皮上的蚁丘 > 地衣结皮。

在沙坡头人工固沙植被区, 由于生态环境的改善, 特别是土壤环境的提高, 导致掘穴蚁大量定居, 它的筑巢对土壤具有反馈作用, 这种反馈作用导致土壤异质性增强, 改善了土壤环境的状况, 加速了土壤和植被的演变。

关键词 掘穴蚁 生物干扰 土壤特性 土壤种子库

文章编号: 1000-0933 (2007)04-1508-07 中图分类号: Q142 文献标识码: A

Study on the eco-functions of *Formica cunicularia* (Hymenoptera: Formicidae) in a revegetated area on the southeast fringe of Tengger Desert, North China

CHEN Ying-Wu^{1,2}, LI Xin-Rong^{1,*}, SU Yan-Gui¹, DOU Cai-Hong², JIA Xiao-Hong¹, ZHANG Zhi-Shan¹

1 Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions Experimental & Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 College of forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (4): 1508 ~ 1514.

Abstract: *Formica cunicularia* (FC) is one of the dominant mound-building ant species in arid and semi-arid regions in China. It can modify the soil parameter to a considerable extent through nest building activities. The effects of FC on soil properties, moisture, and seed bank in the Shapotou region were investigated in this paper.

The results show that the longer sand is consolidated, the more active FCs are, the more effects they produce on sand. The activities of FC vary with topographic locations and more nests in hollows and windward slopes while less in dune tops and leeward slopes. The organic matter, total and available N, P and K are enriched in the soil of nests. Comparing with the adjacent soil, the bulk density of soil of ant nest is lower in depth of 10–20 cm and higher in depth of 0–10 cm, and

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40671011, 40471006, 40501004, 40401004); 中国生态系统研究网络 (CERN) 资助项目

收稿日期 2006-03-06; **修订日期** 2006-11-28

作者简介 陈应武 (1972~), 男, 甘肃临洮人, 博士, 主要从事昆虫生态研究. E-mail: chengyw_gau@163.com

* **通讯作者** Corresponding author, E-mail: lxinrong@ns.lzb.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40671011, 40471006, 40501004 and 40401004); Chinese Ecological System Research Net

Received date 2006-03-06; **Accepted date** 2006-11-28

Biography CHEN Ying-Wu, Ph. D., mainly engaged in insect ecology. E-mail: chengyw_gau@163.com

soil electric conductivity and water content are higher. And also, both seedling density and diversity in anthill are higher than those in adjacent soil.

The establishment of planted sand-binding in the Shapotou region improves the environment and provides a favorable living condition for ants. On the contrary nesting activities of ant also affected soil properties. Thanks to the ant bioturbation, soil moisture, texture, properties and seed bank had been modified, which leads to the increasing of the soil heterogeneity and improvement of soil condition, and quickens evolution of soil and vegetation.

Key Words : *Formica cunicularia* ; bioturbation ; soil properties ; soil seed bank

蚂蚁具有庞大的生物量,是陆地生态系统中分布最为广泛的生物之一,也是生态系统重要的组成元素,是生态系统“工程师”^[1,2]。蚂蚁通过营巢活动改变土壤的物理特性^[3],增加了土壤的保水能力、空隙度^[4],改变土壤容重^[5]。蚂蚁的生物干扰活动也影响土壤的化学特性,与邻近土壤相比,蚁丘的有机质、N、P 和 K 含量升高^[6~9]; K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子在蚁丘富集^[10] 蚁丘 pH 值也发生变化^[11,12]。蚁丘上植物的组成和相对丰富度也不同于邻近土壤^[13~15]。

但是这些研究主要来自北美、巴拿马、委内瑞拉、英格兰、波兰和阿根廷的热带雨林^[6], Savanna 稀树草原^[7]、沙漠流域^[8]、半干旱山地针叶林^[9]、钙质草地^[10]、海岸草原^[11]、牧场^[12,22]、草地^[13,23,24]、农田^[15],国内仅见侯继华等在松嫩草地研究了蚂蚁筑丘活动对植物群落多样性的影响^[6],关于中国干旱区蚂蚁的生态功能角色的研究未见报道。

本文在沙坡头人工固沙植被区,通过调查掘穴蚁蚁丘密度和蚁丘盖度在不同固沙年代和不同地形的分布差异,探讨人工固沙植被建立时间和地形对掘穴蚁筑丘活动的影响,同时通过野外和室内实验研究了掘穴蚁筑丘活动对土壤理化特性、土壤水分和土壤种子库的影响。通过对沙坡头人工植被区掘穴蚁营巢活动对土壤水分、理化性质和种子库影响的研究,丰富我国荒漠区生态系统研究的资料 and 措施,为正确认识蚁类在荒漠生态系统逆转中的功能和作用提供依据,为正确评估和认识荒漠生态系统的健康、稳定与功能和过程提供途径。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏中卫市境内的沙坡头地区,地处腾格里沙漠东南缘,地理位置 37°27'N,104°57'E,属于草原化荒漠地带,海拔 1500m。该区年均气温 9.6℃,年均降水量为 181.6mm,年蒸发量达 3000mm^[17]。为了确保包兰铁路沙坡头段的畅通无阻,自 1956 年起中国科学院和有关单位建立了“以固为主,固阻结合”的防护体系^[18]。人工植被区建立后经过 40 多年的演变,流沙成土过程已经开始,沙层表面结皮层厚度逐年增厚,伴随着流沙成土过程一些 1 年生植物和苔藓、藻类等隐花植物大量侵入,促使生态环境向草原化荒漠的地带性方向发展。植物种除了人工种植的灌木柠条 (*Caragana korshinskii*)、花棒 (*Hedysarum scoparium*)、中间锦鸡儿 (*C. intermedia*)、籽蒿 (*Artemisia sphaerocephala*)、油蒿 (*A. ordosica*) 外,有天然繁衍的小画眉草 (*Eragrostis poaeoide*)、雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、刺沙蓬 (*Salsola ruthenica*)、虎尾草 (*Chloris virgata*)、三芒草 (*Aristida adscensionis*)、虫实 (*Corispermum declinatum*) 和油蒿等。由于大量物种的繁殖和定居,使原有的流沙演变成了一个复杂的人工-天然荒漠植被混合体^[19]。

1.2 研究方法

2005 年 8 月,在沙坡头人工固沙植被区按照不同固沙年代 (1956、1964、1981 和 1987 年) 及其各年代植被区内的不同地形 (迎风坡、背风坡、丘顶和丘间地) 各设置 3 个 10m × 10m 的样方,共 48 个样方。调查样方内掘穴蚁蚁丘密度 (个/m²) 和蚁丘覆盖度 (%)。蚁丘盖度用蚁丘面积估计,公式: $s = \pi (D + d)^2 / 4$ 。其中: $\pi = 3.1415$ 按照相互垂直方向量取蚁丘直径,其中数值较大为直径 D ,较小为直径 d 。

2005 年 4 ~ 10 月,在沙坡头 1956 年人工固沙植被区随机选取 11 个蚁丘,用 Trase-TDR (Soil Moisture Equipemnt Corp. USA),测量蚁丘及其距离蚁丘 1m 处裸地土壤 0 ~ 15cm 和 15 ~ 30cm 深的土壤水分,每月两

次（5 和 30 日）。用土壤环刀法测量蚁丘和距离蚁丘 1m 处 0~10cm 和 10~20cm 深度的土壤容重。土壤物理化学特性的取样为 1956 年固沙区随机选取 5 个蚁丘和距离蚁丘 1m 处裸地,采集 0~15cm 深的土样。土壤 pH 值用电位法测定（HS-4 智能酸度计）,土壤电导率（EC）用电导法测定,土壤有机质用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,土壤全氮采用开氏定氮法（Vecator AB, Sweden）,全磷（酸溶-钼锑抗比色法）、全钾（NaOH 熔融-火焰光度计法）及有效磷（NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法）、速效钾（醋酸铵-火焰光度计法）的含量和速效磷用盐酸-氟化铵-氯化亚锡比色法^[6]

土壤种子库的取样 2005 年 8 月,选择苔藓和地衣两种结皮覆盖的土壤上的蚁丘及其距离蚁丘 1m 处的结皮覆盖的土壤,取直径 10cm,高 10cm 的柱状原状土带回室内（6 个重复）,栽植在直径 11cm 的花盆内,每日浇水,逐日鉴定并统计萌发的幼苗。种子多样性指数采用辛普森指数 D' ^[1] 和香农-维纳指数 H' ^[2],丰富度指数用 Margalef 指数 D' ^[3], $D = 1 - \sum (p_i)^2$; $H' = -\sum p_i \ln p_i$; $d = (-1)/\ln N$; p_i 为物种 i 个体数, S 是样方内物种 i 的全部总数, N 为全部物种的个体数。

数据的统计分析采用统计软件 SPSS 11.5 for Windows（SPSS inc. USA）。

2 结果与分析

2.1 土壤影响

由于掘穴蚁的筑丘活动导致下层的土壤翻转到地表。这种干扰作用使得土壤的表面出现斑疹状弹坑形蚁丘（图 1a,b）,地下出现隧道和腔室（图 1f）。由于蚁丘的覆盖导致地表微生物结皮变色腐烂（图 1d,e）。

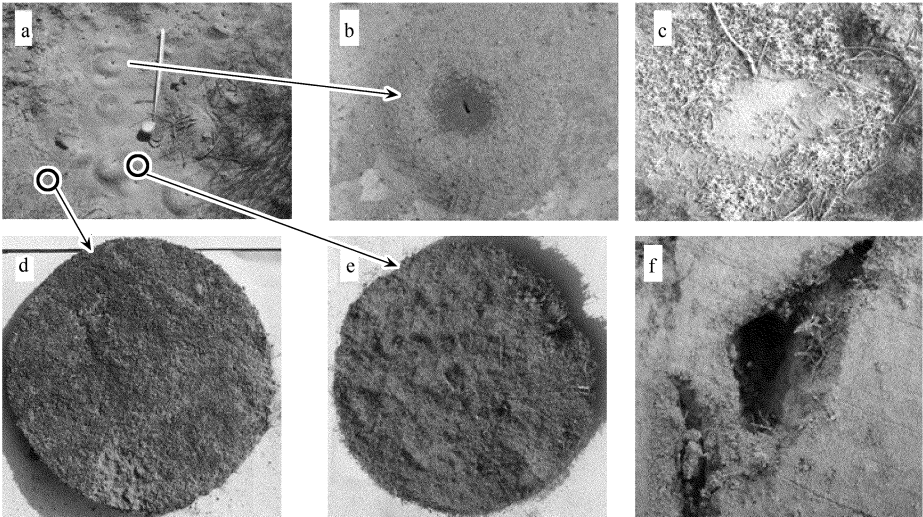


图 1 掘穴蚁对土壤结构、土壤微生物结皮和植被的影响

Fig. 1 *Formica cunicularia* modified the soil, microbiotic crust and vegetation

a 掘穴蚁蚁丘景观 b 掘穴蚁蚁丘 c 蚁丘上的草本植物 d 正常土壤微生物结皮 e 被蚁丘覆盖的土壤微生物结皮 f 地下蚁穴
a : *Formica cunicularia* anthill landscape ; b : Mound of *Formica cunicularia* ; c : Annual herbs/grasses around anthill ; d : Microbiotic crust uncovered by anthill ; e : Microbiotic crust covered by anthill ; f : Cave of *Formica cunicularia* in the soil)

研究结果表明蚁丘和邻近土壤的水分含量不同 蚁丘 0~15cm 和 15~30cm 深的土壤体积含水量均高于邻近土壤,土壤体积含水量在不同月份之间波动,并且对降雨有明显的响应（图 2）。

蚁丘和距离蚁丘 1m 处的土壤理化特性——土壤容重、土壤 pH、土壤有机质、土壤电导率和土壤养分存在显著的差异（ $p < 0.01$ ）。与邻近土壤相比,蚁丘容重（0~10cm）、电导率、有机质、全 N、全 P、全 K、可溶性 N、速效 P 和速效 K 分别升高 8.97%、16.94%、13.55%、11.71%、22.24%、7.09%、15.21%、25.58% 和 14.29%,但是土壤容重（0~20cm）和 pH 下降 4.38% 和 7.31%（表 1）。

表 1 蚁丘和临近土壤的物理化学参数比较 (SD 测验)

Table 1 Comparison of the mean and variance between anthill and adjacent soil in soil parameters (one way ANOVA analysis, LSD tests)

样点 Plots	容重 Bulk density (g/m ³)		电导率 Electric conductivity (μs/cm)	pH	有机质 Organic matter (g/kg)
	0 ~ 10cm	10 ~ 20cm			
蚁丘 Anthill	1.58 ± 0.04b	1.53 ± 0.02b	160.147 ± 30.300b	7.86 ± 0.20b	13.932 ± 0.772b
邻近土壤 Adjacent soil	1.45 ± 0.02a	1.60 ± 0.02a	136.947 ± 25.300a	8.48 ± 0.33a	12.270 ± 0.446a

样点 Plots	全养 Total nutrition (g/kg)			速养 Available nutrition (g/kg)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
蚁丘 Anthill	0.515 ± 0.030b	0.885 ± 0.020b	25.822 ± 0.547b	4.152 ± 0.369b	1.910 ± 0.349b	18.667 ± 1.155b
邻近土壤 Adjacent soil	0.461 ± 0.051a	0.724 ± 0.072a	24.112 ± 0.413a	3.604 ± 0.400a	1.521 ± 0.255a	16.333 ± 0.577a

每列标识字母不同的值表示差异显著 ($\alpha = 10, p < 0.05$), 标识字母相同表示差异不显著 ($\alpha > 0.05, n = 10$) In same column, values with different letters are significantly different at $p < 0.05$ ($\alpha = 10$), the same represents no significantly different at $p > 0.05$ ($\alpha = 10$)

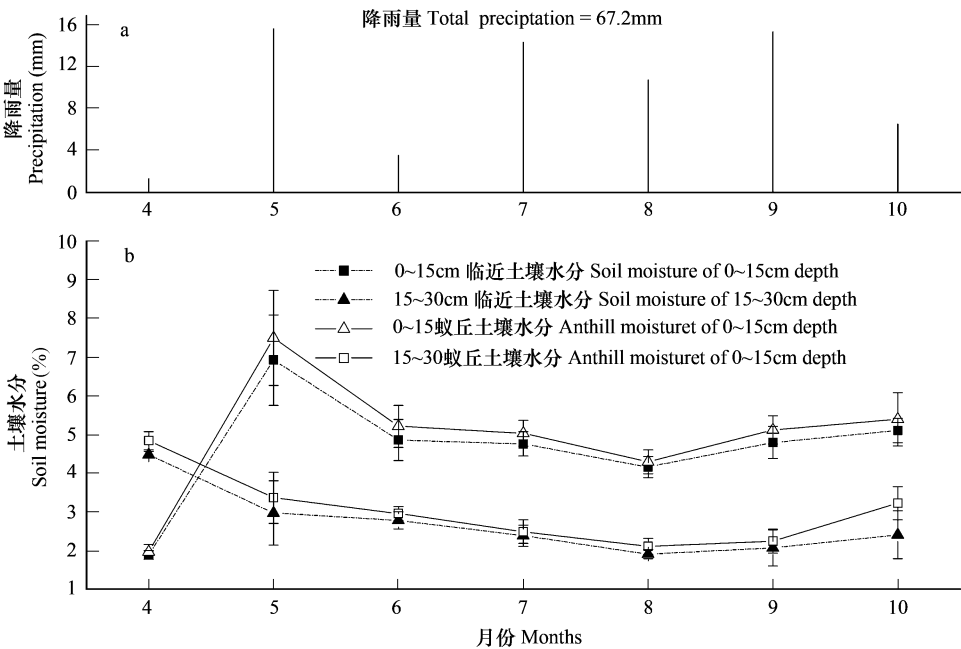


图 2 月降雨量及蚁丘和邻近土壤水分比较

Fig.2 Precipitation and soil water content (mean ± S.E.) of 0 – 15cm and 15 – 30cm depth of anthill and adjacent soil of months

2.2 地形和固沙年代对筑丘活动的影响

图 3 显示,随着固沙年代的延长,掘穴蚁的蚁丘密度和盖度增加 在同一年代固沙植被区,地形影响蚁丘密度和盖度,不同地形之间的大小顺序分别为 :丘间地 > 迎风坡 > 丘顶 > 背风坡。1956 年固沙植被区丘间地的掘穴蚁蚁丘密度和蚁丘盖度最高,分别为 31.33% ± 4.67% 和 7.80% ± 2.44%。

2.3 掘穴蚁筑丘活动对土壤种子库的影响

不同年代的固沙区的不同土壤结皮和不同结皮上的蚁穴的土壤种子库的物种及其多样性不同,植物种子共有 5 种 (小画眉草、油蒿、狗尾草、虎尾草、雾冰藜和虫实, 其中种子数量最多为小画眉草), 5 种植物在各个取样点之间有重叠 (表 2)。不同取样点 苔藓结皮、地衣结皮、苔藓结皮上的蚁丘和地衣结皮上的蚁丘) 之间的植物多样性不同,其多样性的依次大小依次为 :苔藓结皮上的蚁丘 > 苔藓结皮 > 地衣结皮上的蚁丘 > 地衣结皮 (表 2)。总种子密度在苔藓结皮、地衣结皮、苔藓结皮上的蚁丘和地衣结皮上的蚁丘之间有显著的差异 ($p < 0.01$), 总种子密度在不同取样点间的大小顺序为 :苔藓结皮上的蚁丘 > 苔藓结皮 > 地衣结皮上的蚁丘 > 地衣结皮 (图 4)。

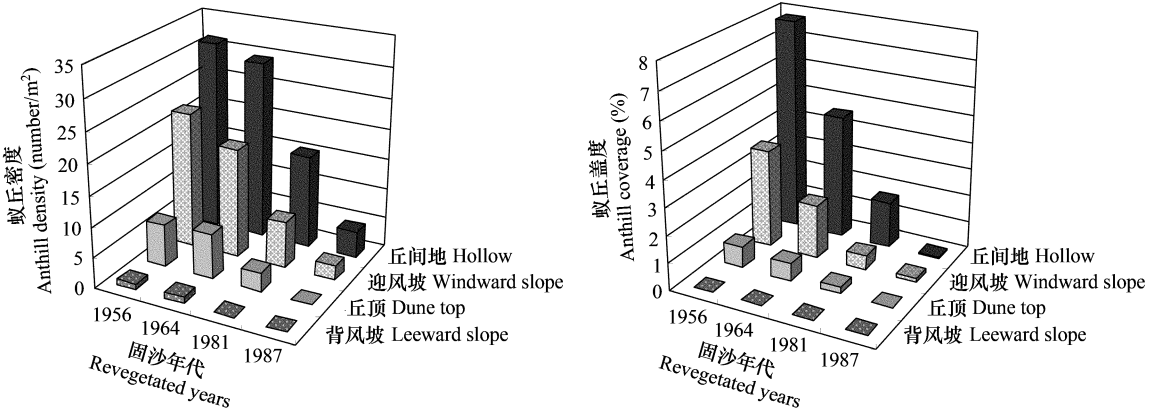


图3 地形和固沙年代对蚁丘密度和蚁丘盖度的影响

Fig. 3 Effects of revegetated years and landforms on anthill density and coverage

表2 不同结皮及其蚁丘的土壤种子多样性比较

Table 2 The comparison of soil seedbank diversity in four locations (moss/algae crust and anthill in moss/algae crust)

多样性指数 Biodiversity indexes	苔藓结皮上的蚁丘 Anthill in moss crust	苔藓结皮 Moss crust	藻类结皮上的蚁丘 Anthill in algae crust	藻结皮 Algae crust
Simpson 多样性指数 diversity index h')	0.454	0.348	0.286	0.234
Shanon-Wiener 多样性指数 diversity index h')	0.928	0.769	0.614	0.528
Margaelf 丰富度指数 richness index h')	0.362	0.424	0.353	0.386
植物种类 Plant species	小画眉草 <i>E. poaeoides</i> 油蒿 <i>A. ordosica</i> 狗尾草 <i>S. viridis</i> 虎尾草 <i>C. virgata</i> 雾冰藜 <i>B. dasyphylla</i> 虫实 <i>C. declinatum</i>			

3 讨论与结论

在沙坡头固沙植被区,地形及其固沙年代对蚁丘密度有显著的影响。随着固沙年代的增加蚁丘密度也增加,这是由于固沙植被建立后通过 40 多年的演变,流动沙丘上成土作用的发生,结皮厚度在不断加强,土壤从流沙相向荒漠草原相演化,流沙生态系统演变为复杂的天然-人工生态系统^[9]。环境的改变为掘穴蚁的入侵定居创造了条件,演变时间越长,系统越复杂,越有利于掘穴蚁的筑巢。就地形而言,由于迎风坡和丘间地结皮的厚度高土壤发育好,有利于掘穴蚁的定居,背风坡由于陡度高土壤发育差不利于掘穴蚁定居,丘顶由于易受风蚀常常出现流沙活化斑,土壤环境不稳定而不易掘穴蚁筑巢。

掘穴蚁的生物干扰活动使得地表出现丘状流沙的聚集,由于流沙比重大于结皮和表层土壤的容重,导致蚁丘 0~10 cm 的土壤容重上升,地下出现隧道和巢穴,土壤的空隙度增大,使得 10~20 cm 土壤的容重下降^[4,35]。与结皮相比,蚁丘流沙的疏松结构有利于降水的下渗,同时有机物被埋在地下增加了土壤的保水能力^[6,37]。再者,蚁丘为翻转到地表的流沙,由于流沙的覆盖截断了土壤毛细管提水,导致土壤水分蒸发的降

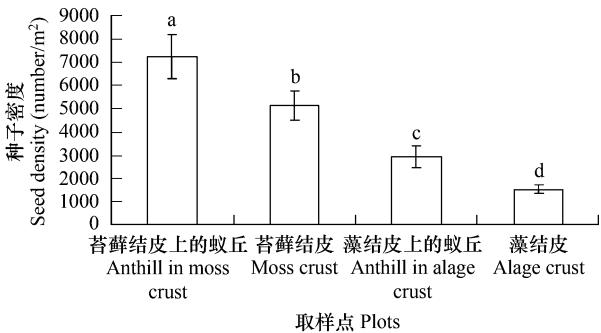


图4 结皮和蚁丘上的总种子密度比较

Fig.4 Comparison of mean $\pm$ S. E. of total seeds density in different sites

柱形图上字母不同表示在 0.01 水平显著, $n=5$, algae/moss crust and anthill in algae/moss crust, bar with different letters are significantly difference at 0.01 level, same letters

低^[8] 此外蚂蚁开口在地表的蚁道有利于降水沿隧道向深层土壤入渗。 这些因素的作用,导致蚁巢土壤含水量高于邻近土壤。

研究结果显示掘穴蚁的筑丘活动对土壤的化学特性有着显著的影响。 很多研究也表明与比邻土壤相比蚁丘有机质、P、N 和 K 的含量都增加^[9~41],在瘠薄的土壤上这些差异显得尤为突出,并且这些变化的大小与蚂蚁群体的大小、生物量和土壤翻转量有关^[42]。和邻近土壤相比,蚁巢区土壤有机质、盐分、pH 和养分的富集主要有 3 个方面:一方面为自身物质的分解,蚂蚁的活动形成的蚁丘覆盖了表层结皮和有机质,导致有机物(土壤微生物结皮和凋落物)的腐烂分解;第二为蚂蚁粪便和排泄物在蚁巢的聚集;另一方面是外部物质的输入^[43],蚂蚁聚集食物——动物尸体和蚜虫蜜露等,也导致土壤养分和无机盐在蚁穴的富集。在干旱沙漠区土壤 pH 值呈碱性,由于蚁丘上有机物的分解,导致土壤有机酸的含量上升,使得 pH 值下降。本文研究结果验证了以上观点。

掘穴蚁蚁丘和邻近土壤的种子库不同,是由于蚁丘有利于植物种的入侵。在腾格里沙漠地区,风季通常在 7 月开始,翌年 4 月份结束,这期间也是多数植物种子成熟和扩散的季节,种子雨多富集在比较粗糙的土壤表面,由于微生物结皮表面相对光滑,所以动物巢穴和灌木下聚集了密度较高的植物种子^[44]。另外由于蚁丘具有高的土壤含水量和养分,这有利于植物的生长,导致蚁丘上定居的植物的种子产量高。

掘穴蚁筑丘的生物干扰主要表现在改变土壤水分、土壤质地结构、理化性质和种子库,这些干扰导致土壤异质性增强,改善了土壤环境的状况,加速了土壤和植被的演变。

References :

[1] Hölldobler, B and Wilson E O. The Ants. Cambridge, USA :Belknap Press of Harvard University Press, 1990.

[2] Patricia J F. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning : a review. Biodiversity and Conservation, 1998, 7 :1221 – 1244.

[3] Brain M V. Production Ecology of Ants and Termites. IBP 13, Cambridge, UK :Cambridge University Press, 1978.

[4] Majer J D, Walker T C, Berlandier F. The role of ants in degraded soils within Dryandra state forest. Mulga Res. Ctre. J., 1987, 9 :15 – 16.

[5] Baxter P F, Hole H. Ant (*Formica cinerea*) pedoturbation in a prairie soil. Soil Sci. Soc Am. Proc., 1967, 31 :425 – 428.

[6] Salem M, Hole F. Ant (*Formica exsectoides*) Pedoturbacion in a Forest Soil. Soil Sci. Soc. Amer., 1968, 32 :563 – 567.

[7] Czerwinsky Z, Jakubczyk H, Petal J. The influence of ants of the genus Myrmica on the physico-chemical and microbiological properties of soil within the compass of ant hills in Strzeleckie Meadows. Polish J. Soil Sci., 1969, 3 :51 – 58.

[8] Petal J. The role of ants in Ecosystems. In :V. Brain, eds. Production Ecology of Ants and Termites. Cambridge, UK :Cambridge Univ. Press, 1978. 293 – 325.

[9] Mandel R D, Sorenson C J. The role of harvester ant (*Pogonomyrmex occidentalis*) in soil formation. Soil Sci. Soc. Am. J. 1982, 46 :785 – 788.

[10] Paton T R, Humphreys G S, Mitchell P B. Soils : a new global view. New Haven :Yale University Press, 1995.

[11] Wiken E B, Broersma K, Lavkulich L M, Farstad L. Biosynthetic alteration in a British Columbia soil by ants (*Formica fusca*). Soil Sci. Soc. Am. J., 1976, 40 :422 – 426.

[12] Petal J. Ant populations, their regulation and effect on soil in meadows. Ekologia Polska., 1980, 28 :297 – 326.

[13] Woodell S R J. Ant-hill vegetation in a Norfolk salt marsh. Oecologia, 1974, 16 :221 – 225.

[14] Horvitz C C, Schmeske W. Ant-nest soil and seedling growth in a neotropical ant-dispersed herb. Oecologia, 1986, 92 :288 – 290.

[15] Farji-Brener A G, Margutti L. Patterns of plant species in relation to Acromyrmex lobicornis nest-mounds on roadside vegetation in Northwest Patagonia. Int. J. Ecol. and Env. Sci., 1997, 23 :37 – 47.

[16] Haines B L. Element and energy flow through colonies of the leaf-cutting ant, Atta Colombica, in Panama. Biotropica, 1978, 10 :270 – 277.

[17] Farji-Brener A G, Silva J F. Leaf-cutting ant nests and soil fertility in a well-drained savanna in Western Venezuela. Biotropica, 1995, 27 :250 – 253.

[18] Whitford W G, Di Marco R. Variability in soils and vegetation associated with harvester ant (*Pogonomyrmex rugosus*) nests on a Chihuahuan desert watershed. Soil. Fert. Soils, 1995, 20 :169 – 173.

[19] Carlson S R, Whitford W G. Ant mound influenced on vegetation and soils in a semi-arid mountain ecosystem. Am. Midl. Nat., 1991, 126 :125 – 139.

[20] King R L. The plant ecology of ant-hills in calcareous grasslands I. Patterns of species in relation to anthills in southern England. J. Ecol.

1997,65 :235 – 256.

〔1〕 Lockaby B G, Adams J C. Pedoturbation of a forest soil by fire ants. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1985, 49 :220 – 223.

〔2〕 Czerwinski Z, Jakubczyk H, Petal J. Influence of ant hills on the meadow soils. Pedobiologia, 1971, 1 :277 – 285.

〔3〕 Culver D C, Beattie A J. Effects of ant mounds on soil chemistry and vegetation patterns in a Colorado Montane Meadow. Ecology, 1983, 64 :485 – 492.

〔4〕 Beattie A J, Culver D C. Effects of the mound of the ant (*Formica obscuripes*) on the surrounding soil. The Am. Mid. Nat. , 1997, 97 :390 – 399.

〔5〕 Levan M A, Stone E L. Soil modifications by colonies of black meadows ants in a New York old field. Soil. Sci. Soc. Am. J. , 1983, 47 :1192 – 1196.

〔6〕 Hou J H,Zhou D W,Jiang S C. The Effect of hill-building activities of ants on the species diversity of plant communities in Songnen Grassland. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26 (6) :323 – 32.

〔7〕 Li X R, Ma F Y, Long L Q, *et al.* Study on soil water content of sand-binding vegetation in Shapotou region. Journal of Desert Research, 2001, 21 (6) :217 – 222.

〔8〕 Zhao X L. Researched on combating moving-sand in Shapotou region in Tengger Desert. Yinchuan :Ningxia People Publishing, 1988. 101 – 120.

〔9〕 Li X R, Xiao H L, Liu L C, *et al.* Long-term effect of sand-fixed vegetation on restoration of biodiversity in Shapotou region in Tengger Desert. Journal of Chinese Desert, 2005, 25 (1) :173 – 181.

〔10〕 Liu G S, Jiang N H. Analysis of soil physical and chemical properties and profile describing. Chinese Standard Publishing, 1996.

〔11〕 Simpson E H. Measurement of diversity. Nature, 1949. 163 :688.

〔12〕 Peet R H. The measurement of species diversity. Annual Reviews of Ecology and Systematics,1974, 5 :285 – 307.

〔13〕 Margalef R. Information theory in ecology. General Systematic, 1958, 3 :36 – 71.

〔14〕 Baxter P F, Hole H. Ant (*Formica cinerea*) pedoturbation in a prairie soil. Soil Sci. Soc Am. Proc. , 1967, 31 :425 – 428.

〔15〕 Rogers L E. The ecological effects of the western harvester ant (*Pogonomyrmex occidentalis*) in the shortgrass plains ecosystem. USA/IBP Grassland Biome. Technical Report. , 1972 :206.

〔16〕 Lobry de Bruyn L A, Conacher A J. The effect of ant biopores on water infiltration in soils in undisturbed bushland and in farmland in a semi-arid environment. Pedobiologia, 1994, 38 :193 – 207.

〔17〕 Wang D, Lowery B, McSweeney K, Norman J M. Spatial and temporal patterns of ant burrow openings as affected by soil properties and agricultural practices. Pedobiologia , 1996, 40 :201 – 211.

〔18〕 Xiao H L, Zhang J H, Li J G. Development of fertility of Aeolian soil in the shifting sand fixation in the southeastern Tengger Desert. Journal of Desert Research 1996, 16 (suppl.) , 64 – 69.

〔19〕 Salem M, Hole F. Ant (*Formica exsectoides*) Pedoturbacion in a Forest Soil. Soil Sci. Soc. Amer. , 1968, 32 :563 – 567.

〔20〕 Paton T R, Humphreys G S, Mitchell P B. Soils :a new global view. New Haven :Yale University Press. , 1995.

〔21〕 Mandel R D, Sorenson C J. The role of harvester ant (*Pogonomyrmex occidentalis*) in soil formation. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1982, 46 :785 – 788.

〔22〕 Petal J, Chmielewski K, Czepinska-Kaminska D, Konecka-Betley K, Kulinska D. Ant communities in relation to changes in some properties of hydrogenic soils differentially transformed. Ekologia Polska, 1992, 40 :553 – 576.

〔23〕 Levan M A, Stone E L. Soil modifications by colonies of black meadows ants in a New York old field. Soil. Sci. Soc. Am. J. , 1983, 47 :1192 – 1196.

〔24〕 Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts :Structure, Function, and Management. Berlin :Springer, 2003. 503

参考文献：

〔6〕 侯继华,周道玮,姜世成. 蚂蚁筑丘活动对松嫩草地植物群落多样性的影响. 植物生态学报, 2002, 26 (6) :323 ~ 329.

〔7〕 李新荣,马风云,龙利群,等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分的研究. 中国沙漠, 2001, 21 (6) :217 ~ 222.

〔8〕 赵兴梁. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川 :宁夏人民出版社, 1988. 101 ~ 120.

〔9〕 李新荣,肖洪浪,刘立超,等. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响. 中国沙漠, 2005, 25 (1) :173 ~ 181.

〔10〕 刘光崧,蒋能慧,等. 土壤理化分析及剖面描述. 中国标准出版社, 1996.

〔18〕 肖洪浪,张继贤,李金贵. 沙漠流沙固定过程中土壤肥力的演变. 中国沙漠, 1996, 16 (增刊) :64 ~ 69.